

REUSO DE PNEUS EM GEOTECNIA

Luciano V. Medeiros, PhD, Professor Adjunto PUC-Rio ⁽¹⁾ e UNIGRANRIO
Alberto S. F. J. Sayão, PhD, Professor Associado PUC-Rio
Denise M. S. Gerscovich, DSc, Professora Adjunta UERJ
Ana Cristina C. F. Sieira, MSc, Pesquisadora em Doutorado PUC-Rio

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,
Rua Marques de São Vicente 225, sala 301 L, Rio de Janeiro, R. J., Brasil, 22 453 – 900,
tel : (55 21) 529-9325, fax : (55 21) 511-1546, e-mail : medeiros@civ.puc-rio.br

RESUMO

Este trabalho descreve a pesquisa sobre a técnica de estabilização de encostas com o uso de pneus, realizada no Rio de Janeiro, Brasil. Malhas de pneus usados foram testadas como alternativas para construção de muros de contenção e para utilização como elementos de reforço de solos

Um muro experimental com 60m de comprimento e 4m de altura foi construído com camadas horizontais de pneus preenchidos com solo compactado. Os pneus foram amarrados entre si com corda de polipropileno ou arame de gabião. Uma sobrecarga de solo compactado com 2m de altura foi colocada sobre o retro-aterro de solo. O muro apresenta 4 seções instrumentadas, com características diferentes quanto à amarração, geometria e configuração dos pneus (cortados ou inteiros). Apresenta-se uma breve descrição dos aspectos construtivos e do comportamento mecânico das 4 seções do muro.

Quanto a utilização de pneus usados como elementos de reforço de solos foram executadas campanhas de ensaios de arrancamento. Nestes ensaios, malhas de pneus cortados e inteiros enterrados, sob diferentes tensões confinantes, foram submetidas a esforços de tração. O objetivo desses ensaios foi avaliar o comportamento tensão-deformação-resistência do aterro reforçado para diferentes arranjos de pneus.

PALAVRAS-CHAVE: Pneus Usados, Muros de Gravidade, Estabilização de Taludes, Reforço de solos

1. INTRODUÇÃO

Pneus são resíduos que se acumulam rapidamente em grandes volumes, particularmente, em regiões urbanas densamente ocupadas. O destino final dos pneus é um problema de âmbito mundial, existindo uma crescente preocupação com políticas de incentivo à reciclagem, redução e reutilização dos rejeitos de pneus. A utilização de pneus usados em obras de engenharia apresenta-se como uma alternativa que associa a eficiência mecânica e o baixo custo do material, favorecendo a demanda por um rejeito que apresenta riscos ao meio ambiente.

Uma das primeiras aplicações de pneus usados na prática da Engenharia Civil ocorreu na década de 70, com a reconstrução de um aterro reforçado com pneus em uma rodovia no norte da Califórnia (Hausmann, 1990). As camadas horizontais de pneus eram espaçadas verticalmente de 0,60m e interligadas com alças de metal. Os estudos relacionados à utilização da técnica de pneus e solo (denominada “*pneusol*” ou solo-pneus) foram

desenvolvidos na França, com a construção de um muro experimental de solo-pneus em Langres (Long, 1984). A construção deste muro, com 5m de altura e 10m de extensão, demonstrou a viabilidade de execução de estruturas a partir do lançamento de camadas de pneus preenchidos com solo.

Desde então, outras estruturas utilizando pneus foram construídas como muros de contenção. Como exemplos, pode-se citar os muros de Ferrupt, com 54m de extensão e 5m de altura, e o de Bussang, contendo 6 trechos distintos em um total de 650m de comprimento e até 7m de altura (Long, 1990). Em Ottawa (Canadá), um aterro experimental com 4m de altura e 17m de extensão foi construído visando o estudo da utilização de pneus em reforço e em muros de contenção (Garga e O'Shaughnessy, 1995). Os registros disponíveis na literatura referem-se apenas aos detalhes da utilização da técnica, com poucas informações a respeito da deformabilidade do material solo-pneus.

A PUC-Rio vem desenvolvendo desde 1995 um amplo projeto de pesquisa, com a participação da Universidade de Ottawa, Canadá, e da Fundação Geo-Rio, Prefeitura do Rio de Janeiro (Garga et al, 1999). O objetivo do projeto consiste no estudo de uma técnica de estabilização de taludes de execução simples e dirigida ao consumo substancial de pneus usados. O projeto foi centrado na construção de um muro de arrimo experimental instrumentado, executado com pneus dispostos em camadas horizontais. Neste muro, os pneus são inteiros ou cortados, amarrados horizontalmente com arame ou corda, e preenchidos com solo compactado. O uso de pneus cortados e inteiros teve como objetivo verificar o efeito da remoção da banda lateral na deformabilidade do muro (Medeiros et al, 1997).

O estudo da viabilidade de utilização de malhas de pneus usados como elemento de reforço também se insere neste projeto.

O presente trabalho visa descrever aspectos construtivos desta pesquisa, apresentar resultados relativos ao comportamento do material solo-pneus e avaliar a aplicabilidade destas alternativas na engenharia civil.

2. MATERIAL SOLO-PNEUS E SISTEMAS DE AMARRAÇÃO

Pneus são constituídos de borracha e são fortemente reforçados com fibras e metais, resultando num material com elevada resistência a tensões radiais. As propriedades mecânicas dos pneus permanecem disponíveis mesmo após encerrada a vida útil como elemento de rodagem.

A escolha dos pneus a serem utilizados deve considerar a facilidade de obtenção dos mesmos nas proximidades do local da obra. É recomendável, entretanto, que os pneus utilizados apresentem aproximadamente o mesmo diâmetro.

Neste projeto de pesquisa foram utilizados pneus com aproximadamente 0,60m de diâmetro e 0,20m de largura de banda de rolamento, dimensões correspondentes a pneus de veículos de passeio.

A amarração dos pneus foi executada com arame de gabiões (tipo Maccaferri) ou 2 voltas na corda de polipropileno com 6mm de diâmetro. Cordas com diâmetro inferior a 6mm podem se deteriorar ou romper durante a vida útil da obra. Em contrapartida, diâmetros superiores a 6mm dificultam a confecção do nó de amarração.

No caso do muro experimental, os pneus internos foram interligados a 4 pneus adjacentes através de 1 volta na amarração. Por se tratar de um muro de peso, não houve necessidade de amarração vertical, ou seja, entre pneus de camadas consecutivas.

3. MURO EXPERIMENTAL

O muro foi construído com 60m de comprimento e 4m de altura em uma área plana a jusante de uma encosta apresentando sinais de instabilidade, em Jacarepaguá, Rio de Janeiro, sendo constituído por camadas horizontais de pneus preenchidos com solo residual compactado e amarrados entre si com corda ou arame. A face externa apresenta uma inclinação média de 1:8 (H:V). Atrás do muro de pneus foi executado um retro-aterro constituído do mesmo material de preenchimento dos pneus. Ao término da construção do muro, foi adicionada ao retro-aterro uma sobrecarga de 2m de altura de solo.

Com o objetivo de comparar o comportamento de diferentes configurações, o muro foi composto de 4 seções transversais distintas, medindo 15m de comprimento cada, instrumentadas com células de pressão, extensômetros magnéticos verticais e inclinômetros, conforme mostra a Figura 1. As seções transversais apresentaram as seguintes características (Medeiros et al, 1997):

Seção A: composta por pneus inteiros, amarrados com corda de polipropileno de 6mm de diâmetro. Apresenta largura variável, com 6 pneus na base e 4 pneus no topo, como ilustra a Figura 2;

Seção B: apresenta características de geometria e amarração semelhantes às da seção A, sendo porém composta por pneus cortados (sem uma das bandas laterais). Após o corte, a banda lateral era colocada dentro do pneu, aumentando a resistência radial e evitando a geração de rejeitos secundários. A Figura 3 mostra um pneu inteiro e um cortado.

Seção C: composta por pneus cortados e com geometria semelhante à da seção B. No entanto, os pneus estão amarrados com arame de gabiões (tipo Maccaferri), protegido contra corrosão por uma cobertura plástica de PVC;

Seção D: similar à seção B, diferindo apenas por apresentar uma geometria mais esbelta, com largura constante de 3 pneus.

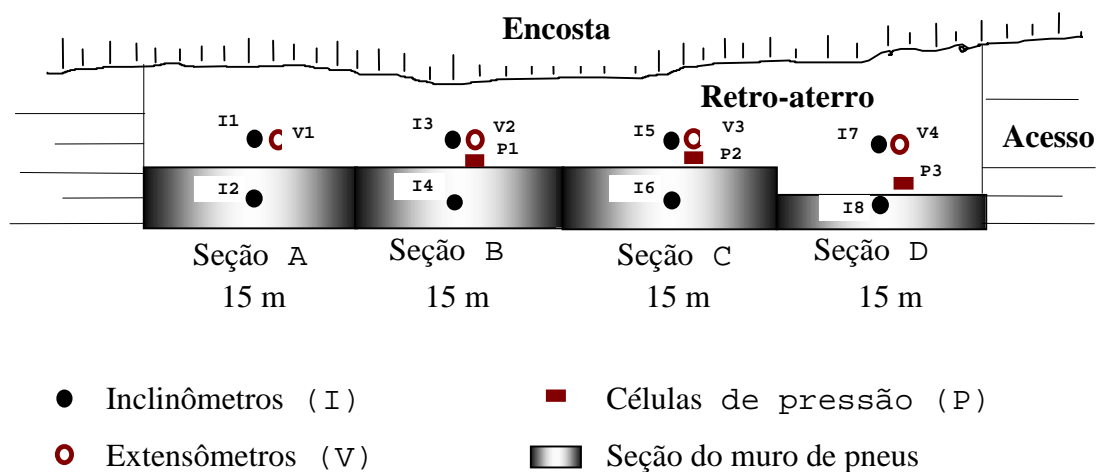


Figura 1 - Planta esquemática do muro experimental e da instrumentação de campo.

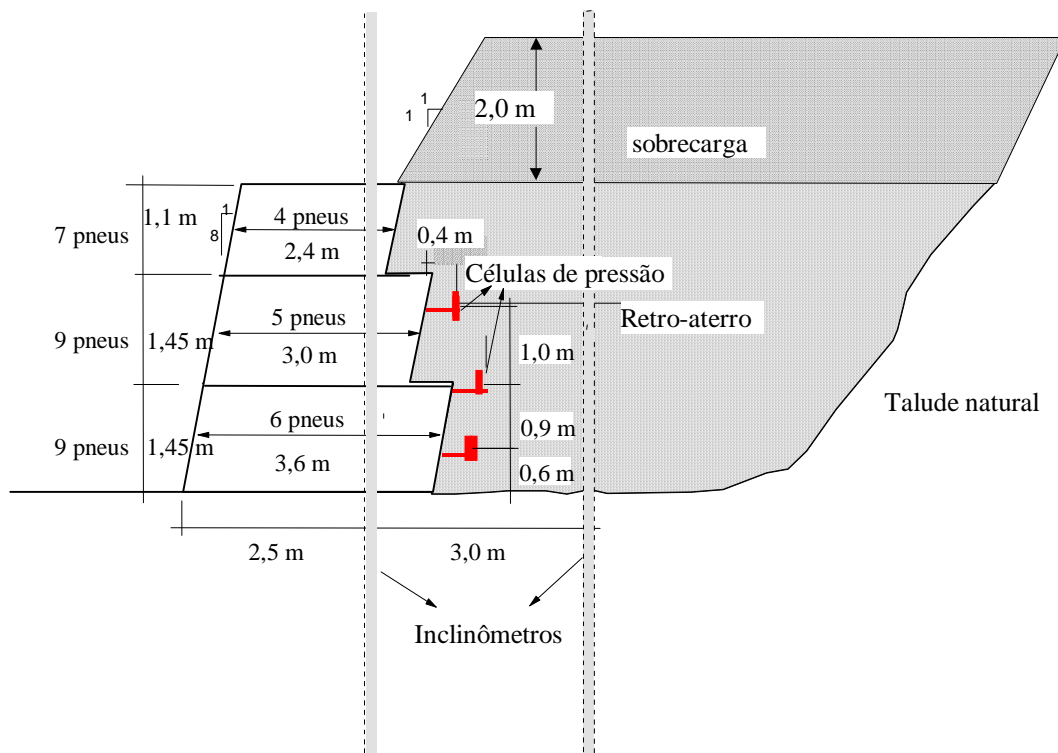


Figura 2 - Seção transversal típica



Figura 3 – Pneu Inteiro e Cortado

No total, foram utilizados cerca de 15 mil pneus para a execução do muro experimental. As Figuras 4 a 6 ilustram fases distintas da construção do muro experimental.



Figura 4 – Estágio inicial da construção do muro: posicionamento da 1ª camada de pneus



Figura 5 – Estágio intermediário e detalhe da amarração com corda de polipropileno



Figura 6– Final da construção do muro.

O solo local foi utilizado tanto para preenchimento dos pneus quanto para execução do retro-aterro. O material pode ser classificado como um silte areno-argiloso, proveniente do intemperismo de rocha gnáissica. Ensaios de caracterização, realizados por Fontes (1997), indicaram valores médios de densidade dos grãos (G_s), limites de Atterberg (LP e LL), índice de plasticidade (IP) e teor de umidade natural (ω), conforme apresentado na Tabela 1. Nesta tabela estão incluídos os índices de compactação de campo.

Tabela 1 - Caracterização do solo

Ensaio de Laboratório					Compactação de Campo		
G_s	LP (%)	LL (%)	IP (%)	ω (%)	γ (kN/m^3)	S (%)	e
2,724	31,0	46,0	15,0	20,0	17,5	65	0,833

Ensaio de laboratório triaxial e de cisalhamento direto indicaram parâmetros de resistência médios de intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito (ϕ') iguais a 13kPa e 29°, respectivamente. Estes valores foram observados para a condição de umidade de campo; no caso de saturação, a coesão torna-se nula (Fontes, 1997).

O peso específico do material solo-pneu foi determinado através de ensaios de densidade *in situ* (Figura 7), tendo sido observado um valor médio da ordem de 16 kN/m^3 (Sieira, 1998).



Figura 7 - Ensaio de densidade *in situ*.

3.1 Resultados da Instrumentação

O muro experimental de solo-pneus foi instrumentado com extensômetros magnéticos, células de pressão e inclinômetros, como indica a Figura 1. Os movimentos horizontais da massa de solo foram monitorados por 8 inclinômetros, sendo 4 instalados no interior do retro-aterro e 4 no interior do muro de solo-pneus. Os recalques verticais foram monitorados por 16 extensômetros magnéticos, instalados em 4 verticais no interior do retro-aterro. Os valores da pressão total desenvolvida na interface entre o muro e o retro-aterro foram observados por

células de pressão instaladas em 3 conjuntos nas seções B, C e D. Não houve medição de pressão total na seção A.

A Figura 8 mostra um resultado típico dos deslocamentos horizontais medidos no interior do muro, para as etapas de final de construção e após a aplicação da sobrecarga. Em todas as seções observou-se que, ao final de construção, o deslocamento horizontal máximo ocorreu no terço central da altura do muro, variando entre 0,5% a 0,7% da altura do muro. Deslocamentos adicionais ocorreram após a aplicação da sobrecarga, concentrados na região superior do muro. Apesar dos deslocamentos, as tensões horizontais medidas durante a construção se aproximam de uma distribuição linear correspondente ao empuxo no repouso. Após a aplicação da sobrecarga há um aumento na mobilização da resistência ao cisalhamento, resultando numa redução significativa das tensões horizontais aplicadas no muro (Medeiros et alli, 1999). A Figura 9 ilustra os resultados das células de pressão.

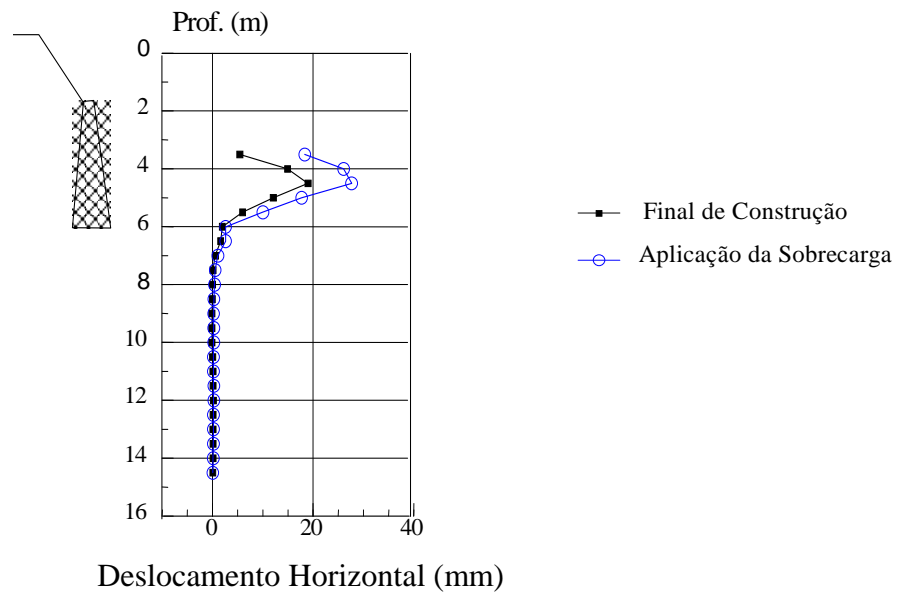
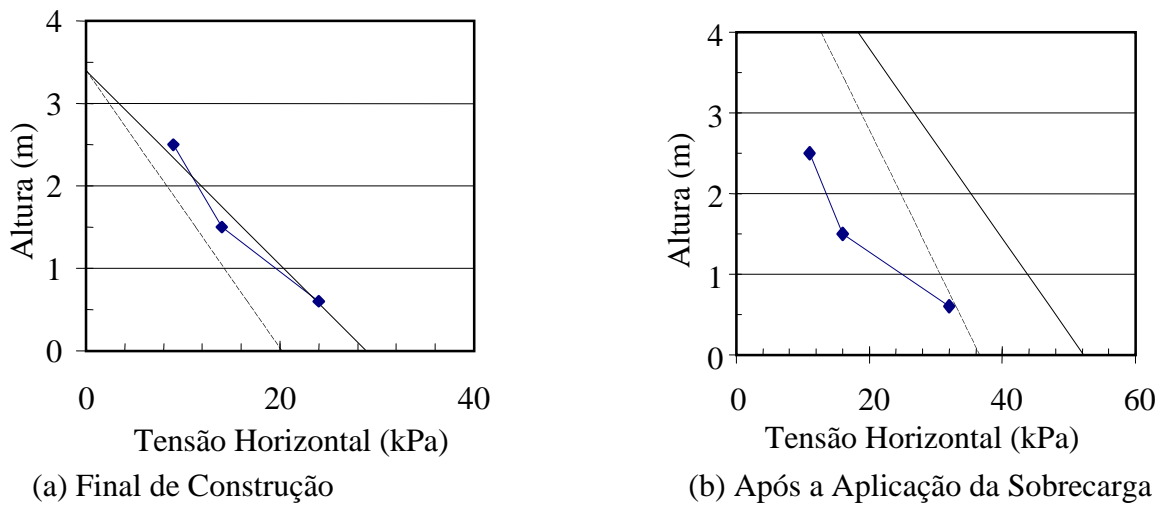


Figura 8 - Deslocamentos horizontais



(a) Final de Construção

(b) Após a Aplicação da Sobrecarga

- ◆ Células de Pressão
- Rankine
- Tensão Horizontal no Repouso

Figura 9 – Distribuição das Tensões Horizontais Medidas e Previstas
Remoção da Banda Lateral: Pneus Cortados X Inteiros

A remoção de uma banda lateral facilita a compactação do solo no interior dos pneus com o solo, gerando um conjunto solo-pneus mais rígido. A Figura 10 apresenta a comparação entre os deslocamentos horizontais medidos nas seções com pneus inteiros (seção A) e pneus cortados (seção B), após a aplicação da sobrecarga. Nesta figura observa-se uma redução de cerca de 30% nos deslocamentos horizontais quando são utilizados pneus cortados.

O uso de pneus cortados determina a necessidade de um equipamento específico para remoção da banda lateral, especialmente no caso de pneus radiais (reforçados com aço). Entretanto, apesar deste custo adicional, a remoção da banda acelera o processo construtivo, devido à maior facilidade de amarração e preenchimento dos pneus.

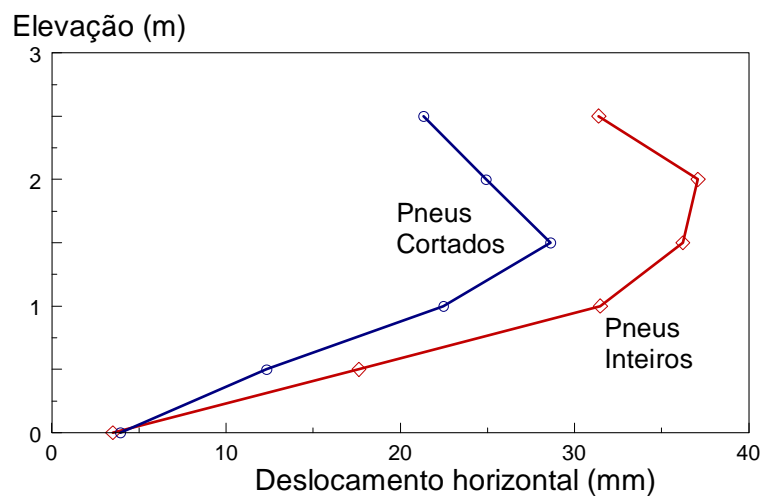


Figura 10 – Influência da Remoção da Banda Lateral

Sistema de Amarração de Pneus: Corda X Arame

A amarração com arame conferiu um pequeno aumento de rigidez ao muro de solo-pneus. A Figura 11 apresenta a comparação entre os deslocamentos horizontais medidos nas seções com arame (seção C) e corda (seção B), após a aplicação da sobrecarga.

Na prática, a escolha do tipo de amarração deve levar em conta ainda aspectos relacionados ao custo do material (corda ou arame) e à facilidade de execução. Durante o processo construtivo, verificou-se que, enquanto o arame pode ser ajustado com alicate comum, a amarração com corda é um pouco mais trabalhosa e demorada, pois requer a execução artesanal de um nó especial, que seja resistente ao processo construtivo.

Em relação ao material de amarração, verifica-se a necessidade de um comprimento de corda substancialmente maior que de arame (da ordem de 100%), em função da existência do nó e do número de voltas necessárias. No entanto, o custo da corda é aproximadamente cinco vezes inferior que do arame, o que permite concluir que a amarração com corda de polipropileno se apresenta como uma alternativa economicamente vantajosa.

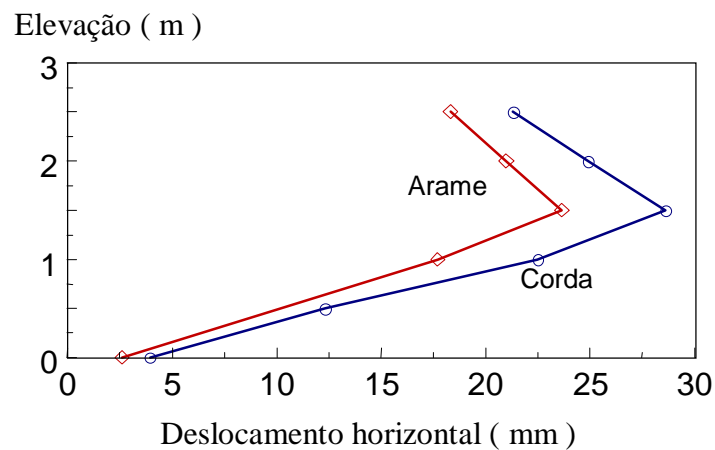


Figura 11 – Influência do Tipo de Amarração

3.2 Simulação Numérica

O processo construtivo do muro foi simulado numericamente com um programa de elementos finitos. Nas análises, os deslocamentos horizontais previstos numericamente foram confrontados com os medidos no campo. Os parâmetros de deformabilidade do material solo-pneus foram então ajustados de forma a reproduzir os deslocamentos do muro. A malha de elementos finitos está apresentada na Figura 12 (Sieira, 1998).

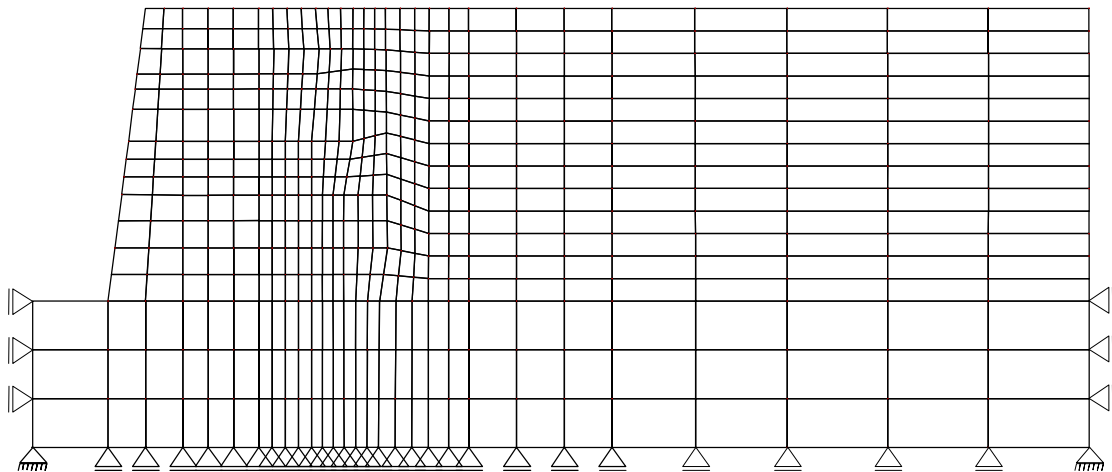


Figura 12– Malha de Elementos Finitos

As análises numéricas sugeriram que o conjunto solo-pneus pode ser representado como um material homogêneo, linear e elástico. A magnitude do módulo de Young (E) foi da ordem de 2,5 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,35 (Sieira et alli, 2000).

Os resultados obtidos nesta simulação são de particular interesse para a prática da engenharia geotécnica, pois demonstram que muros de solo-pneus com geometria mais esbelta podem se apresentar como uma alternativa segura de contenção de taludes. A figura

13 mostra os deslocamentos horizontais previstos para seções transversais de muros com largura da base variando entre 2 a 6 pneus. Nota-se que há uma variação significativa dos deslocamentos quando a largura da base é reduzida para larguras equivalentes a 2,5 pneus para 2 pneus.

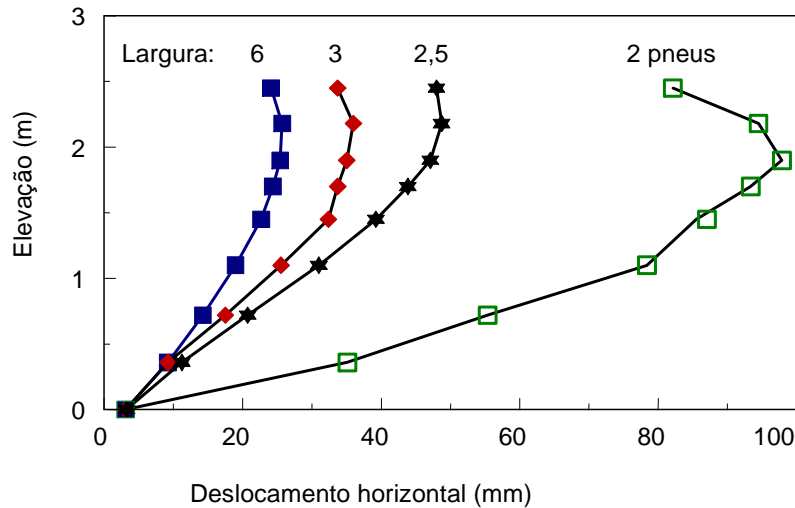


Figura 13 - Variação dos deslocamentos em função da largura do muro.

4. MALHAS DE PNEUS USADOS COMO ELEMENTO DE REFORÇO

A técnica de solo reforçado consiste na introdução de elementos na massa de solo, em geral, metálicos ou geossintéticos, que se estendem além da zona de ruptura. A resistência ao cisalhamento, desenvolvida entre o elemento de reforço e o solo, reduz as componentes de empuxo atuantes na estrutura de contenção, melhorando sua condição de estabilidade. Nestes casos, a resistência ao cisalhamento solo-geossintético ou solo-metal (terra armada) é uma parcela da resistência ao cisalhamento do solo propriamente dito.

O reforço do solo se manifesta através da mobilização de dois mecanismos: (1) resistência ao cisalhamento no contato solo-reforço, estabelecida a partir da combinação das parcelas de atrito solo-elemento e/ou solo-solo; (2) resistência passiva, na região frontal ao reforço. Estes 2 mecanismos produzem uma resistência ao conjunto a qual representa uma fração da resistência do solo propriamente dita.

A utilização de pneus como elemento de reforço, faz uso principalmente da resistência ao cisalhamento na interface: solo contido no interior do pneu e solo no exterior. Em contrapartida, esta alternativa atribui à estrutura como um todo uma maior flexibilidade, cuja aplicabilidade deve ser examinada à luz dos máximos recalques permissíveis de um determinado projeto.

Com o objetivo de avaliar o comportamento tensão, deformação e resistência, do pneu como elemento de reforço, ensaios de arrancamento foram executados em diferentes configurações de pneus usados, cortados e inteiros. A Figura 14 apresenta, em corte e em planta, o esquema geral dos ensaios.

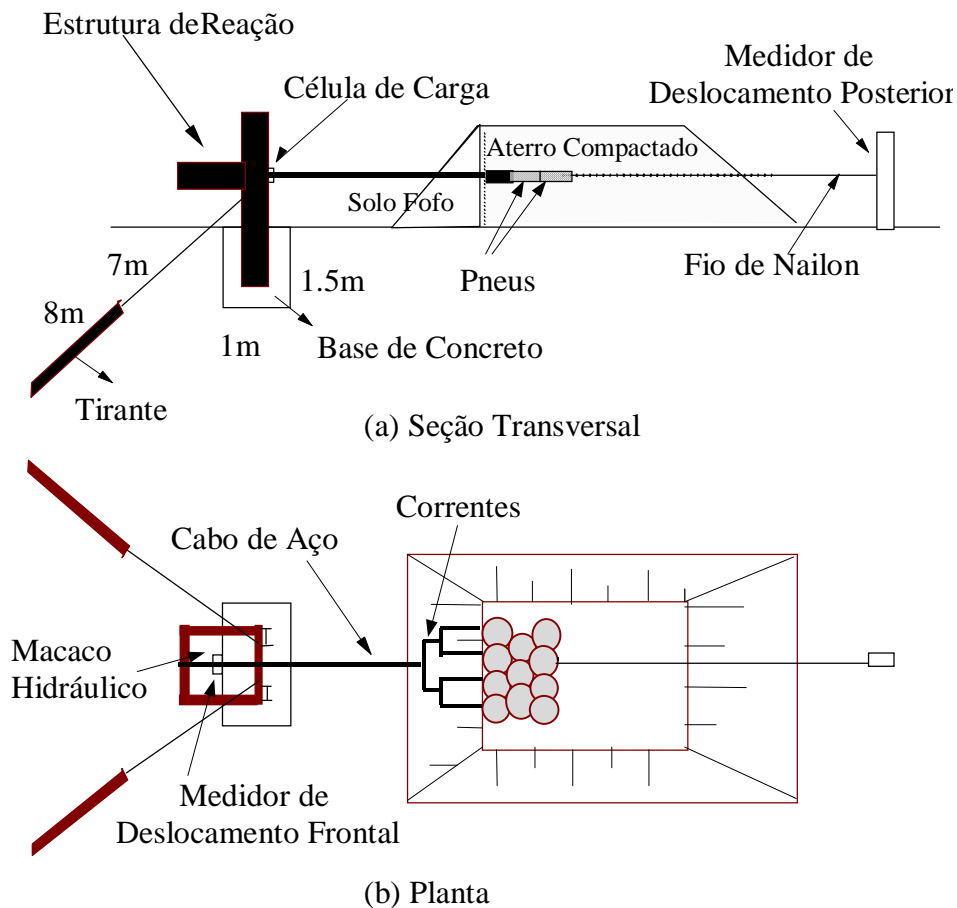


Figura 14 - Esquema do Ensaio de Arrancamento

Para execução dos ensaios foi projetada uma estrutura metálica, composta por um quadro horizontal de vigas de aço, fundada sobre base de concreto (Figura 15). A estrutura foi ancorada em solo residual jovem, através de dois tirantes inclinados, com 15m de comprimento cada. Estes tirantes foram projetados para resistir a esforços horizontais de arrancamento de até 500kN.

A carga de tração, ativada por uma bomba hidráulica, transmitia a pressão para um macaco hidráulico posicionado no cabo de arrancamento (Figura 15).

O esforço de tração foi aplicado a cada um dos pneus, localizados na parte frontal, através de uma corrente metálica presa ao tirante de tração. Este sistema garantiu independência de deslocamentos desta linha de pneus.

A frente desta estrutura, sobre um colchão de areia de 0,5m de espessura, a malha de pneus amarrados entre si era posicionada horizontalmente, sendo a parte interna dos pneus preenchida manualmente com solo compactado. Uma sobrecarga de aterro arenoso, de altura variável entre 0,5m e 1,5m era aplicada sobre a malha de pneus. A compactação deste aterro também era feita de forma manual.

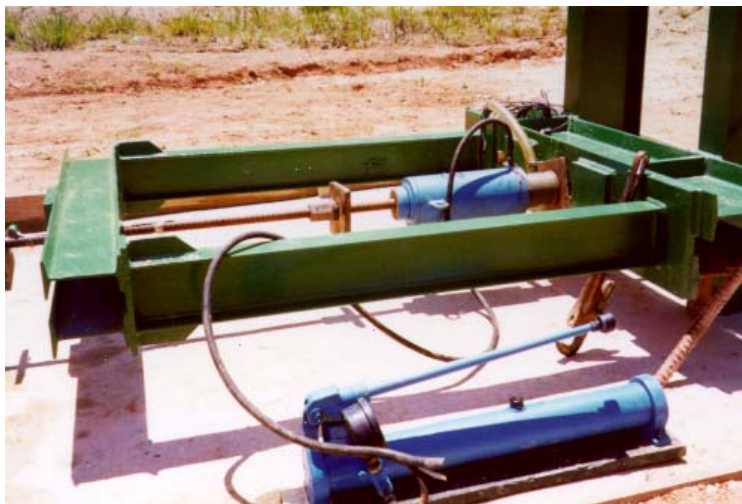


Figura 15 - Estrutura de Reação e Macaco Hidráulico





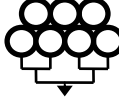
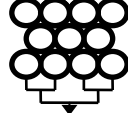
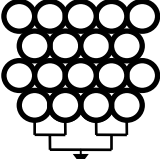
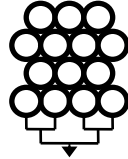
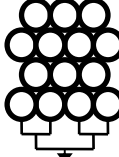
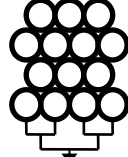
Para reduzir os possíveis efeitos de resistência passiva do solo durante o arrancamento, o solo localizado à frente da malha de pneus era mantida no estado fofo. A Figura 16 apresenta uma vista do aterro durante um ensaio.

Os deslocamentos horizontais, correspondentes à primeira fila de pneus, foram medidos na parte frontal, junto à estrutura de reação. Os deslocamentos correspondentes à última fila foram medidos através dos deslocamentos de um cabo auxiliar de náilon, amarrado ao pneu posicionado no centro da fila. A Tabela 2 resume as configurações ensaiadas.



Figura 16 – Vista do Aterro Durante Ensaio

Tabela 2 – Configurações Ensaaiadas

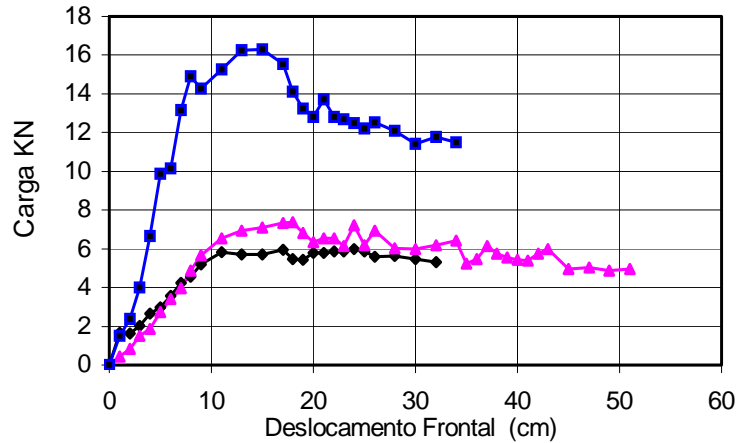
Configuração	Descrição	Configuração	Descrição
	1 Pneu Cortado/Inteiro		2 Pneus Cortados
	2X3 Pneus Cortados		4 Pneus Cortados
	4X3 Pneus Cortados		4X3X4 Pneus Cortados
	4X5X4X5 Pneus Cortados		4X3X4X3 Pneus Cortados (2 camadas)
	4X3X4X3 Pneus Inteiros (2 camadas)		4X3X4X3 Pneus Cortados

4.1 – Resultados dos Ensaios

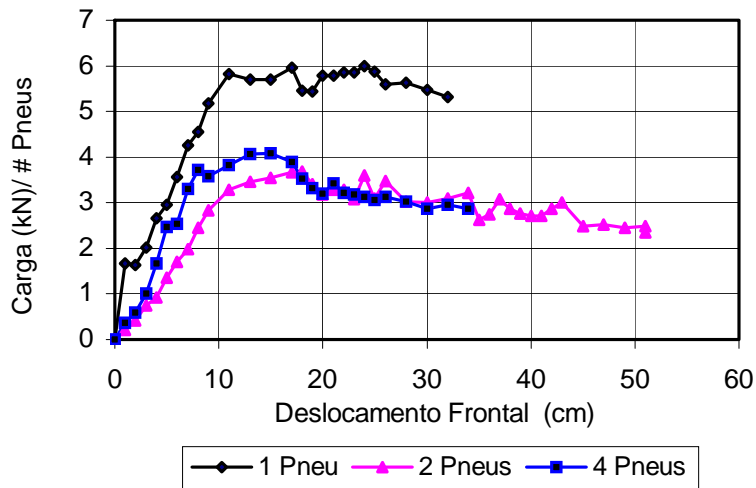
A influência do número de pneus, quando estes são posicionados em uma linha transversal à direção do movimento, pode ser avaliada a partir dos resultados apresentados na Figura 17.

O aumento do número de pneus resulta em um aumento na carga de ruptura e pouco influencia nos deslocamentos. Ensaios com mais de um pneu indicam uma redução de aproximadamente 38% na carga de ruptura por pneu. Em termos médios, o valor obtido nos ensaios com 2 e 4 pneus foi de 3,8kN/pneu, enquanto o resultado com 1 pneu forneceu uma carga de arrancamento de 6kN (Figura 17b).

Pneus enterrados, amarrados entre si e submetidos a cargas de arrancamento sofrem deformações expressivas, cujos níveis afetam a estrutura do solo contíguo. A redução da resistência ao cisalhamento, quando se ensaia um grupo de pneus, é mais uma vez atribuída à mobilização de uma resistência residual. Adicionalmente, a dificuldade de compactação manual do solo no interior do pneus ou mesmo nos espaços entre pneus se acentua na medida que mais pneus são utilizados e, possivelmente, reduzem o grau de compactação alcançado.



(a) Resultado Individual



(b) Resultado Normalizado

Figura 17 - Pneus em Linha – 1m sobrecarga

Na fase inicial dos ensaios, os deslocamentos frontais se devem à deformação da primeira linha de pneus. Com o prosseguimento do ensaio, as linhas subsequentes vão sendo sucessivamente mobilizadas. A Figura 18 compara os resultados de ensaios com um número crescente de linhas de pneus, para uma mesma sobrecarga de 1m de aterro. Nesta figura verifica-se um ganho de resistência e um aumento dos deslocamentos proporcional ao número de linhas de pneus. Mais uma vez, a carga de ruptura por pneu foi da ordem de 3,8kN. Os deslocamentos associados à ruptura apresentaram, também, um comportamento padrão de aproximadamente 12cm de deslocamento por linha de pneu. Ensaios de arrancamento em geogrelhas, realizados sob a mesma metodologia, forneceram valores de deslocamento na ruptura mais baixos, da ordem de 10cm. (Sayão et alli, 1999)

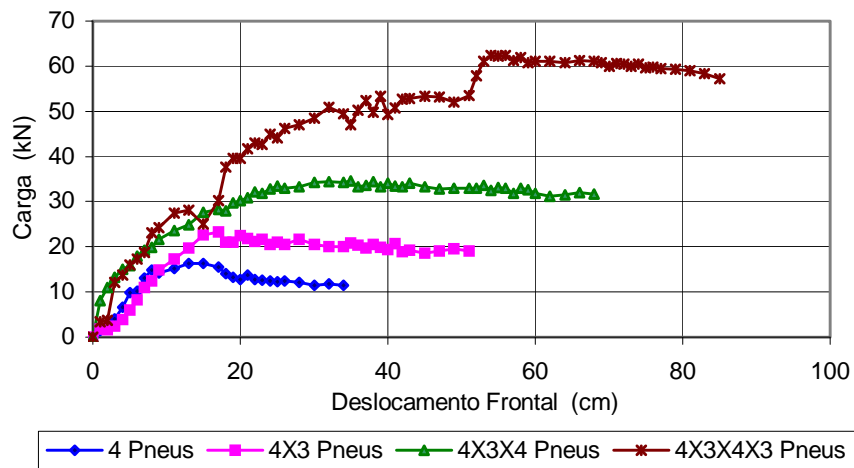


Figura 18 –Malha de Pneus Cortados - Sobrecarga 1m

A existência de mais de uma camada de pneus superpostos foi avaliada comparando-se os resultados dos ensaios executados na configuração 4X3X4X3, aonde dispunha-se de ensaios com 2 camadas de pneus inteiros, 2 camadas de pneus cortados e um ensaio com uma única camada de pneus cortados. Nos ensaios com 2 camadas de pneus, a camada superior foi posicionada de forma descasada para melhorar as condições de resistência na interface entre as duas camadas. Observa-se, a partir da Figura 19, que o comportamento carga x deslocamento não foi significativamente afetado pela variação nas condições de contorno, uma vez que a resistência ao arrancamento é mobilizada principalmente na interface entre o solo no interior do pneu e o solo no exterior. Os resultados indicam também que a geometria do pneu (cortado ou inteiro) não tem influência significativa no comportamento do conjunto.

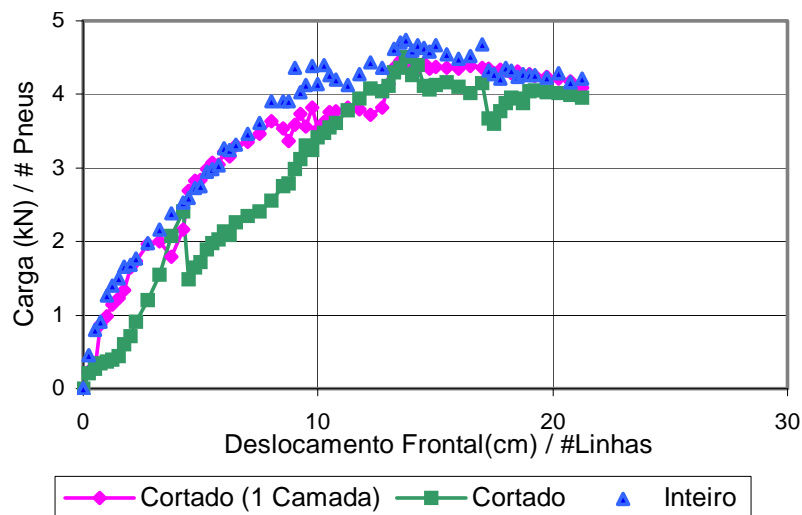


Figura 19 – Comportamento Normalizado Malha de 4X3X4X3 Pneus – Sobrecarga 1m

Para avaliar qualitativamente a resistência ao cisalhamento média mobilizada durante o ensaio, tensões cisalhantes e tensões normais foram calculadas, admitindo-se como área média o somatório das áreas dos pneus. Adicionalmente, considerou-se o fato da resistência ser mobilizada em ambas as faces do reforço. Estes resultados estão sumarizados na Tabela 3.

A figura 20 apresenta os valores tensão cisalhante versus tensão normal, obtidos na ruptura, em conjunto com a envoltória linear que melhor se ajusta aos resultados de campo. Neste gráfico, não foram incluídos os dados coletados com um único pneu, pela sensível diferença de comportamento entre um pneu individual e o efeito de grupo. Ainda nesta figura, a envoltória linear, que melhor se ajusta ao conjunto total de pontos, é apresentada, sendo definida como:

$$\tau_p \text{ (kPa)} = 0,03 + \sigma' \tan 23^\circ \quad (1)$$

Tabela 3 – Resultados dos Ensaio na Ruptura

Configuração		Sobrecarga (m)	Deslocamento Frontal (cm)	Carga (kN)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Coefficiente de Atrito (τ/σ)
1	cortado	1	11	6	16,8	10,6	0,63
2			17	7		6,2	0,37
4			14	16		7,1	0,42
2X3			32	21		7,4	0,44
4X3			18	23		5,8	0,35
4X3X4			34	35		5,6	0,33
4X3X4X3			55	62		7,8	0,46
4X5X4X5			45	65		6,4	0,38
4X3X4X3 (2 camadas)	Cortado	0,5	40	38	8,4	4,8	0,57
		1	59	60	16,8	7,6	0,45
		1,5	60	92	25,2	11,6	0,46
1	Inteiro	1	24	7	16,8	12,4	0,74
4X3X4X3 (2 camadas)	Inteiro	1,0	41	75	16,8	9,5	0,57
		1,5	45	90	25,5	11,4	0,45

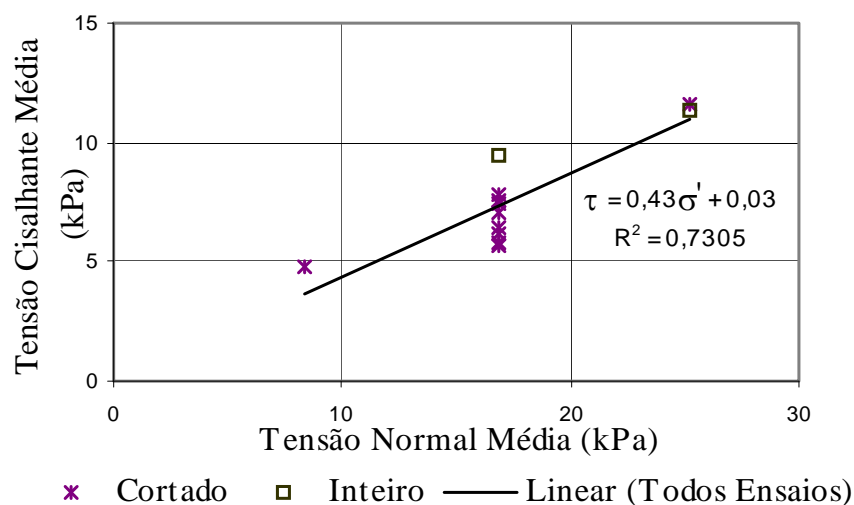


Figura 20 – Envoltória de Resistência

A pequena quantidade de ensaios para níveis de tensão normal mais elevados, impede uma discussão mais detalhada sobre os resultados. Entretanto, a envoltória encontrada indica um intercepto linear praticamente nulo e um coeficiente aparente de atrito equivalente a um ângulo de adesão (δ) de 23° . Com estes parâmetros, verifica-se uma pequena redução com relação à resistência ao cisalhamento do solo propriamente dito de 21% em relação ao ângulo de atrito. A relação entre o coeficiente de atrito na interface solo-reforço e o coeficiente de atrito do solo ($\tan\delta/\tan\phi$) foi de 0,77.

Em ensaios de arrancamento, os principais mecanismos de resistência estão associados a tensões cisalhantes mobilizadas nas interface solo-reforço e ao empuxo normal à direção de movimentação do reforço. A contribuição de cada uma destas parcelas dependerá da magnitude dos deslocamentos necessários a sua mobilização. Na maioria dos casos, os deslocamentos são suficientes para mobilização integral da componente de atrito, mas insuficientes para mobilização da resistência passiva. No caso desta campanha de ensaios, a influência do empuxo passivo da região frontal do pneu foi também minorada, uma vez que na fase de montagem dos ensaios, procurou-se manter o solo à frente da linha de pneus em estado fofo.

O coeficiente de atrito aparente, definido como a relação entre a tensão cisalhante máxima e a tensão normal (τ_{\max}/σ), apresentou valores da ordem de 0,45. No caso dos ensaios com um único pneu, esta relação foi igual a 0,65. Estes valores foram relativamente baixos, se comparados com os obtidos em ensaios com reforço convencional, cujos resultados variaram entre 0,5 a valores superiores a 1. (Mitchell e Villet, 1987)

5. CONCLUSÕES

A utilização de pneus usados para a construção de muros de arrimo se mostrou altamente favorável do ponto de vista do comportamento mecânico da contenção. A estrutura resultante apresenta flexibilidade que possibilita alívio de tensões laterais, mantendo as deformações em um nível compatível com obras civis.

Dentre as principais conclusões pode-se citar que o uso de pneus cortados facilita a compactação e reduz a deformabilidade do muro. Esta alternativa implica na necessidade de aquisição de um equipamento para a remoção da banda lateral. Entretanto, apesar deste custo adicional, a remoção da banda acelera o processo construtivo, devido à maior facilidade de amarração e preenchimento dos pneus.

Ambos os métodos de amarração, com corda ou arame, mostraram-se adequados para evitar deslocamentos laterais excessivos, embora a corda tenha sido a alternativa mais econômica.

A associação entre a instrumentação do protótipo e a simulação numérica foi o fator determinante para possibilitar o entendimento do comportamento da estrutura solo-pneus. No caso do muro de pneus foram utilizados instrumentos para a medição de deslocamentos horizontais e verticais e tensões horizontais. O monitoramento da obra funcionou de modo satisfatório, a exceção dos extensômetros magnéticos que apresentaram problemas relacionados com a leitora, que entretanto, não comprometeram a análise dos resultados.

A análise dos resultados dos ensaios de arrancamento demonstraram que do ponto de vista de resistência ao arrancamento, pneus usados se apresentam como uma alternativa para melhoramento das características mecânicas de aterros, com potenciais aplicações para estradas de rodagem.

Independente da configuração e da condição de contorno utilizada, quanto maior o número de pneus, mais uniforme é a distribuição de carga/pneu e a parcela de deslocamento por linha de pneus. Na presente campanha de ensaio, obteve-se em termos médios 3,8kn de

carga na ruptura/pneu e acréscimo de 12cm de deslocamento para cada nova linha de pneus incluída na configuração.

Os parâmetros de resistência indicaram uma pequena redução do ângulo de atrito do solo propriamente dito atribuída à mobilização da resistência residual, tendo em vista as magnitudes de deformação observadas no campo. Não foi observado nenhuma resistência adicional proveniente da mobilização do empuxo passivo.

Sob o ponto de vista da mobilização da resistência, o uso de pneus como elemento de reforço se mostra como uma técnica eficaz.

A pesquisa indicou que o reuso de pneus em obras geotécnicas se constitui em uma alternativa técnica e economicamente viável. Adicionalmente, propicia uma demanda substancial de um resíduo sólido potencialmente nocivo ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IDRC (International Development Research Centre, Canadá) e à Fundação Geo-Rio (Prefeitura do Rio de Janeiro) pelo financiamento do projeto de pesquisa. Os engenheiros Luís O. Vieira e Márcia H. Andrade, da Geo-Rio, participaram ativamente dos trabalhos de campo. O professor V. K. Garga, da Universidade de Ottawa, Canadá, participou de todas as etapas desta pesquisa. Os autores agradecem ainda ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) e à FAPERJ (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fontes, A.E.B. (1997) - “Ensaio de Campo e Laboratório no Retro-aterro do Muro Experimental de Pneus”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 126p.
- Garga, V.K. and O’Shaughnessy, V. (1995) - “Use of Scrap Tires for Embankment Construction”. 48th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canadá, vol. 1, p. 425 -432.
- Garga, V.K.; Shaughnessy, V.O.; Medeiros, L.V.; Sayão A.S.F.J. (1999) – “Behaviour of Scrap Tire Reinforced Retaining Walls: Canadian and Brazilian Experiences”, 11th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engineering, Foz do Iguaçu, Brasil, vol. 3, p. 1199-1206.
- Hausmann, M.R. (1990) - “Slope Remediation”. Stability and Performance of Slope and Embankments-II, Geotechnical Special Publication n^o. 31, ASCE, edited by R.B. Seed and R.W. Boulanger, vol. 2, p. 1274-1317.
- Long, N.T. (1984) - “Pneusol, Tyresoil, Tiresoil”. Colloque Routes et Developpement, Ecole National des Ponts et Chaussées, France, 17p.
- Long, N.T. (1990) - “The Pneusol”. Publication GT44, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 76p.
- Medeiros, L.V.; Sayão, A.S.F.J.; Garga, V.K.; Andrade, M.H.N. (1997) - “Use of Scrap Tires in Retaining Walls”. International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing, vol.6 , n^o. 4, p. 19-24.
- Medeiros, L.V.; Sayão, A.S.F.J.; Garga, V.K.; Andrade, M.H.N. (1997) - “Use of Scrap Tires in Slope Stabilization”. 2nd Panamerican Symposium on Landslides, ISSMGE, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 2, p. 637-643.
- Medeiros, L.V.; Garga, V.K.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J.; Andrade, M.H.N.

- (1999) – “Analysis of the Instrumentation of a Scrap Tire Reinforced Retaining Wall”, 11th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engineering, Foz do Iguaçu, Brasil, vol. 1, p. 19-25.
- Mitchell, J.K. e Villet, W.C.B. (1987) Reinforcement of Earth Slopes and Embankment. National Cooperative Highway Research Program – Report no. 290, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Sayão A. S. F. J.; Castro, D. C; Medeiros, L. V. & Gerscovich, D.M.S.(1999). Ensaio de Arrancamento de Materiais 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos, Rio de Janeiro, Brazil.
- Sieira, A.C.C.F. (1998) – “Análise do Comportamento de um Muro de Contenção Utilizando Pneus”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 110p.
- Sieira, A.C.C.F.; Sayão, A.S.F.J; Gerscovich, D.M.S.; Medeiros, L.V. (2000) – “Simulação Numérica do Comportamento de um Muro de Pneus”. IV Seminário de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE, São Paulo, Brasil, Julho, pp532-540.